

## 熱アシスト磁気記録における書き込み磁界感度

本間 一匡, 仲谷 栄伸\*, 小林 正, 藤原 裕司  
(三重大, \*電通大)

Writing field sensitivity in heat-assisted magnetic recording

K. Honma, Y. Nakatani\*, T. Kobayashi, Y. Fujiwara  
(Mie Univ., \*UEC)

## はじめに

熱アシスト磁気記録では、媒体を加熱して書き込むので保磁力  $H_c$  はいくらかでも小さくできるが、必要な書き込み磁界  $H_w$  は大きい。モデル計算<sup>1)</sup>を用いてこの理由を考える。

## 計算結果と考察

LLG 方程式を用いたマイクロマグネティック計算とモデル計算による媒体の信号対雑音比を Fig. 1 に示す。どちらも  $H_w$  が 10 kOe 程度必要である。

Fig. 2 は、モデル計算におけるグレイン磁化  $M_s$  の反転確率  $P_{\pm}$  の時間変化であり、グレインの温度  $T$  がキュリー温度  $T_c$  以上から  $T_c$  まで下がったときの時間を 0 とする。  $M_s$  が  $H_w$  に対して反平行から平行に反転する確率が  $P_+$ 、平行から反平行に反転する確率が  $P_-$  である。図中の●は試行時間の一例を示している。モデル計算では、試行時間ごとの  $P_{\pm}$  を用いて、Monte Carlo 法により  $M_s$  の方向を決めている。(a)は  $H_w = 2.5$  kOe のときであるが、 $P_-$  が高いときの試行回数(●の数)が少なく、また  $P_-$  と  $P_+$  の値が近いので、write-error (WE) が大きい。(b)の  $H_w = 5$  kOe のときは、 $P_+$  の値は十分小さいが、やはり  $P_-$  が高いときの試行回数が少なく、WE が大きい。(b)の  $H_w = 10$  kOe のときは、 $P_-$  が高くなるので、 $P_-$  が高いときの試行回数が増え、WE が小さくなる。

試行時間の間隔の逆数は試行周波数  $f_0$  である。 $f_0$  は近似的に  $\alpha/(1+\alpha^2)$ ,  $\sqrt{V}$ ,  $1/\sqrt{T}$ ,  $K_u(T)$  に比例する<sup>1,2)</sup>。ここで、 $\alpha$  はダンピング定数、 $V$  はグレイン体積、 $K_u(T)$  は異方性定数であり、 $K_u(T_c) = 0$  である。 $T_c$  直下では  $f_0$  が低く、試行回数が少ない。 $H_w$  が低いと  $P_+$  が高いときの試行回数が少なくなり、WE を小さくできない。

本研究の一部は情報ストレージ研究推進機構(ASRC)の助成のもとに行なわれました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) T. Kobayashi *et al.*: submitted to *J. Magn. Soc. Jpn.*
- 2) E. D. Boerner and H. N. Bertram: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1678 (1998).

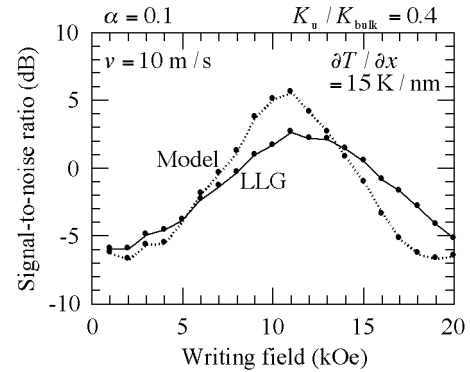


Fig. 1 Dependence of signal-to-noise ratio on writing field employing micromagnetic (LLG) calculation and model calculation.

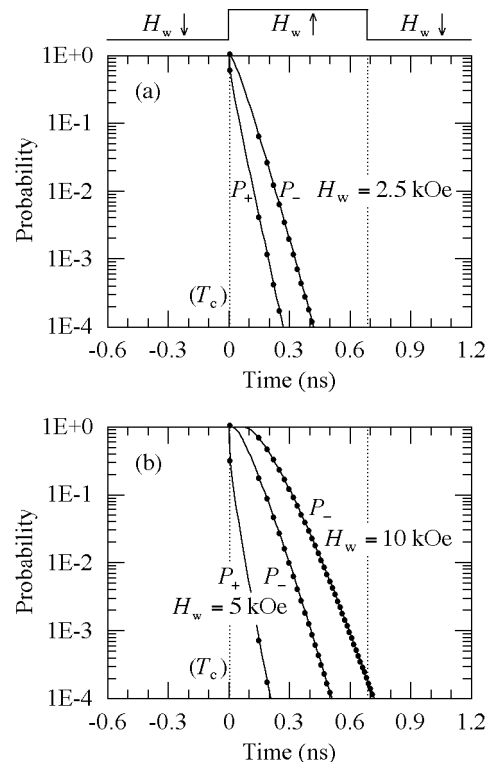


Fig. 2 Time dependence of grain magnetization reversal probability  $P_{\pm}$  for (a) writing field  $H_w = 2.5$  kOe and (b) 5 and 10 kOe.

# 小型・簡便な熱アシスト磁気記録媒体評価装置の開発

○赤羽 浩一, 目黒 栄\*, 斉藤 伸 (東北大学, \*ネオアーク(株))

Development of compact and convenient HAMR evaluation equipment

K. Akahane, \*S. Meguro, S. Saito (Tohoku Univ., \*Neoark Corp.)

## 1. はじめに

実用化を目前に控えた熱アシスト磁気記録では、記録媒体の開発に際して従来媒体と同様の室温での磁気特性評価に加え、磁気特性の温度特性を評価する必要がある。これまで我々は、赤外光における光学反射率変化の温度依存性を計測することにより磁性体のキュリー温度を評価する小型・簡便な装置を開発し、原理検証として 100 nm 膜厚の MnSb 薄膜 (キュリー温度 320°C 程度) のキュリー温度を検出できることを示した。しかしながらこの計測を実際の熱アシスト媒体材料である FePt-C グラニュラ媒体に展開したところ、不可逆的な反射率の温度変化が大きく、磁気相変態点付近で現れる微少な温度特性の傾向変化検出が困難であった。これはヒータを用いてグラニュラ媒体を長時間加熱したことにより、グラニュラ媒体の酸化や構造変化が生じたためと推察している。媒体の構造変化を抑制するためには計測のための加熱を短時間かつ局所領域に限定する必要がある。そこで今回はレーザパルス光を加熱源に付加した光学計測装置を開発したので報告する。

## 2. 装置概要および実験結果

局所領域の昇温動作の検証には、従来の CoPt-SiO<sub>2</sub> 媒体を用いてパルス光照射による熱磁化反転を検出することで行うこととした。Fig. 1 (a) に製作した装置の光学系の構成図を示す。装置は加熱用レーザ光学系、Kerr 効果計測光学系、顕微鏡観察光学系、及び試料励磁用の電磁石系により構成した。加熱光源には波長が 950 nm でシングルモード発振出力 300 mW の小型半導体レーザを用いた。シングルモードのレーザ光は対物レンズで集光した際にスポットサイズを最小化できるので比較的小さな光出力で集光点を高温化することができる。Kerr 効果計測光源には、加熱光源の波長よりも短波長の 650 nm の赤色半導体レーザを用いた。観察光学系には、緑色 LED 光源と CCD カメラとを組み合わせた。Fig. 1 (b) には、試料面における加熱用レーザ光と、Kerr 効果計測用レーザ光のスポット径をビームウエストとして計算した結果を示す。計算によると、加熱レーザの集光径は 2.0  $\mu\text{m}$ 、計測プローブの集光径は 1.4  $\mu\text{m}$  となるので、計測光では加熱スポット中央部の Kerr 効果を検出できる。Fig. 2 には CoPt-SiO<sub>2</sub> 媒体に対して磁場を掃引中に、反転磁場よりも小さな磁場でパルス光を照射した際の熱磁化反転を評価した結果を示す。加熱パルス幅を 10  $\mu\text{s}$  から 1 ms まで変化させて試料の計測ポイントに繰り返し照射したが、Kerr 磁化曲線の終点はほぼ同一点に回帰しており、試料が酸化や構造変化等のダメージを受けていないこと確認できた。パルス光加熱、磁界印加、Kerr 効果による反転検出が可能となったため、今後、赤外光プローブ光学系、表面温度計測光学系を共存させていく予定である。

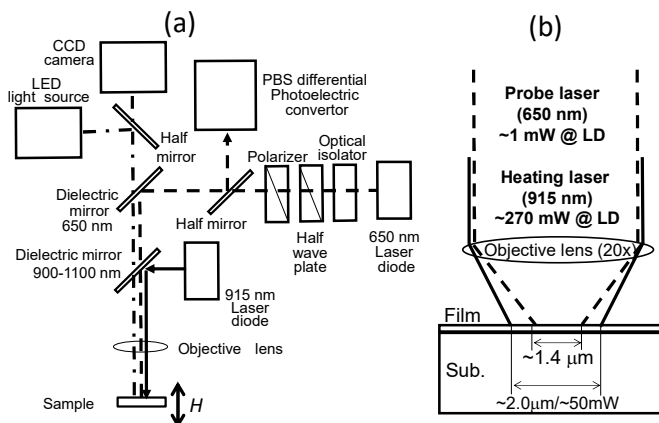


Fig. 1 (a) Schematics of optical layout of the system. (b) Calculated result of spot size of heating and Kerr detection light.

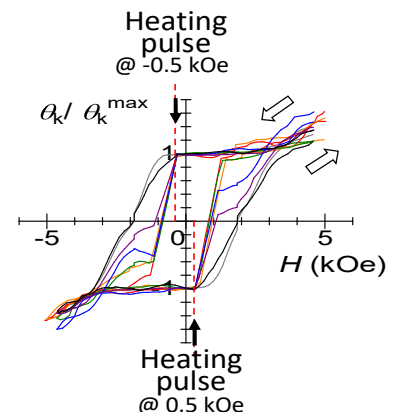


Fig. 2 Magnetization reversal of CoPt-C media by heating pulse at different pulse width.

# 連続波を用いた CoCrPt グラニューラ記録媒体の マイクロ波アシスト磁化反転実験

佐藤勝成, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修, 島津武仁  
(東北大)

Microwave assisted magnetization switching experiments with continuous rf wave on CoCrPt granular media

K. Sato, N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, and T. Shimatsu  
(Tohoku University)

## はじめに

マイクロ波アシスト磁化反転(MAS: Microwave Assisted magnetization Switching) は次世代の高密度磁気記録技術として注目されている。MAS の実験手法としては、大振幅の高周波磁場を印加するために幅  $1\ \mu\text{m}$  程度の線路に高周波電流を印加する手法が多く用いられている。この場合、ジュール熱による試料の温度上昇や破損を防ぐために高周波電流はナノ秒レベルのパルス状で印加される。この手法を用いて測定する場合、パルス磁場の時間でのマイクロ波アシスト効果と、直流磁場による測定時間 ( $10 \sim 10^3\ \text{s}$ ) での熱揺らぎが重畳して観測される。そのため、アシスト効果を見積もるためには、ふたつの異なる時間スケールの現象を同時に考慮する必要がある。本研究では、この難点を解決するため、高周波を連続波として印加できる試料を製作することで、マイクロ波によるアシスト効果と直流磁場による熱揺らぎによる保磁力への影響を同じ時間スケールで議論することを目指した。具体的には、高い熱伝導率を有する Si ウエハーを基板として用いて温度の上昇を抑えた。

## 実験方法および結果

ノンドープの Si ウエハー上に幅  $1\ \mu\text{m}$  の高周波磁場印加用 Au 線路と厚さ  $100\ \text{nm}$  の絶縁層を形成後、厚さ  $15\ \text{nm}$  の CoCrPt-SiO<sub>2</sub> 層を下地層・保護層とともに成膜した。Au 線路上の磁性体を電子線リソグラフィ及び Ar イオンエッチングにより  $0.6 \times 1.6\ \mu\text{m}^2$  の矩形状に加工した。その後、下地層を四端子抵抗測定用および異常 Hall 効果 (AHE) 測定用の二種類の電極形状に加工した。Fig. 1 に、出力  $P_{\text{rf}} = +24\ \text{dBm}$  の連続高周波電流を印加して測定した試料抵抗の周波数依存性を示す。このとき、試料位置での高周波磁場振幅は  $480\ \text{Oe}$  である。高周波電流を印加していないときの抵抗値は図中に点線で示した。右軸は、同じ試料で測定した抵抗変化を温度変化  $\Delta T$  に対応させたものである。高周波電流により  $10\ \text{K}$  程度の温度上昇はみられるものの周波数に対してはほぼ依存しないことが分かった。Fig. 2 に周波数  $18\ \text{GHz}$ 、振幅  $480\ \text{Oe}$  の高周波磁場を印加して測定した AHE 曲線を示す。高周波電流を印加せずに測定した AHE 曲線も併せて示す。高周波磁場の印加により保磁力は  $6.3\ \text{kOe}$  から  $4.3\ \text{kOe}$  へと  $2.0\ \text{kOe}$  低下している。  $10\ \text{K}$  の温度上昇では  $0.13\ \text{kOe}$  しか保磁力が変化しないことから、この保磁力の減少の大部分はマイクロ波アシスト効果によるものである。

## 参考文献

- 1) K. Shimada et al., Technical digest MORIS 2018, Tu-P-01 (2018).

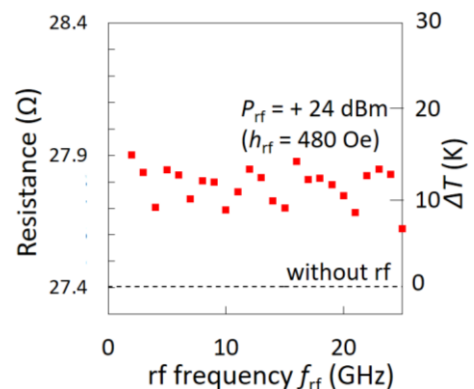


Fig. 1 rf frequency dependence of resistance measured with rf field ( $P_{\text{rf}} = +24\ \text{dBm}$ ,  $h_{\text{rf}} = 480\ \text{Oe}$ )

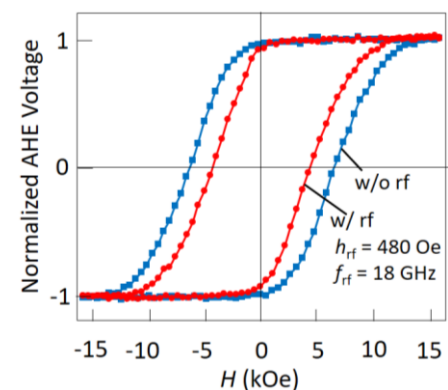


Fig. 2 AHE curves measured with and without rf field ( $h_{\text{rf}} = 480\ \text{Oe}$ ,  $f_{\text{rf}} = 18\ \text{GHz}$ )

# CoCrPt グラニューラ磁気記録媒体における マイクロ波アシスト効果の時間依存性

菊地 瞬, 島津武仁, 菊池伸明, 岡本 聡, 北上 修  
(東北大)

Effective time dependence of microwave assisted switching effect for CoCrPt granular media.

S.Kikuchi, T. Shimatsu, N. Kikuchi, S. Okamoto, and O. Kitakami  
(Tohoku University)

**はじめに** マイクロ波アシスト磁化反転(microwave-assisted magnetization switching, MAS)は次世代 HDD に用いられる高密度記録技術として注目されている。MAS においては磁性体に高周波磁場を印加することで、磁気モーメントの歳差運動を励起し、反転磁場を低減させることができる。我々はこれまでに、CoCrPt グラニューラ媒体に振幅 950 Oe の高周波磁場を印加することにより、保磁力を約 50%低減できることを報告してきた。本研究では、パルス状の高周波磁場を印加する周期を変化させ、MAS の挙動の熱活性領域での時間依存性について調べたので報告する。

**実験方法** 単結晶 MgO 基板の上に線路幅 1 $\mu$ m の Au 線路を形成し、厚さ 100 nm の SiO<sub>2</sub> 絶縁層を成膜した。その上に、厚さ 15 nm の CoCrPt-TiO<sub>2</sub> グラニューラ膜を DC マグネトロンスパッタリングにより成膜した。保護層・下地層を含めた膜の構成は、Pt(2 nm)/CoCrPt-TiO<sub>2</sub>(15 nm)/Ru(10 nm)/[Pt(5 nm)/Ta(2 nm)] $\times$ 5/SiO<sub>2</sub>/Au/MgO sub.である。Au 線路直上の CoCrPt グラニューラ膜を 0.6  $\mu$ m  $\times$  1.6  $\mu$ m の大きさに微細加工し、下地層を異常 Hall 効果(AHE)測定用の電極に加工した。MAS の測定では、高周波電流を Au 線路に印加することで高周波磁場を発生させ、ジュール熱による試料温度の上昇を抑制するため、パルス状で印加した。パルス幅  $t_{width}$  は 20 ns で一定とし、パルス周期  $t_{period}$  を 20  $\mu$ s から 2 s の範囲で変化させた。

**実験結果** Fig. 1 に  $t_{period} = 20 \mu$ s, 6 ms, 2 s の場合の保磁力の周波数  $f_{rf}$  依存性を示す。保磁力は膜面に垂直な直流磁場で測定した AHE 曲線から求め、高周波磁場を印加しない場合の保磁力を図中に点線で示した。いずれの  $t_{period}$  の場合も、 $f_{rf} \leq 18$  GHz の領域では周波数の増加に伴って保磁力が線形に減少した。 $f_{rf} > 18$  GHz の領域では周波数の増加にしたがって保磁力がゆるやかに増加するものの、パルス周期が短くなるにつれてその変化は小さくなり、 $t_{period} = 20 \mu$ s ではほぼ一定の値となった。Fig. 2 に保磁力の実効時間  $t'$  依存性を  $f_{rf} = 10, 18, 24$  GHz について示す。ここで  $t' = (t_{width} / t_{period}) \times 10$  s と定義した。いずれの場合も実効時間の増加に伴って保磁力が減少しているが、その傾きは周波数により大きく異なった。この時間に対する変化は磁化反転時の熱活性に対応しており、周波数による磁化反転プロセスの変化を表している可能性がある。

## 参考文献

1) K. Shimada *et al.*, MORIS 2018 Technical digest, Tu-P-01 (2018)

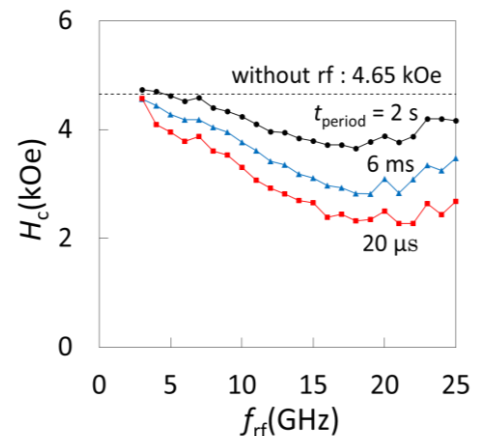


Fig. 1 Frequency dependence of coercivity for  $t_{period} = 2$  s, 6 ms, and 20  $\mu$ s.

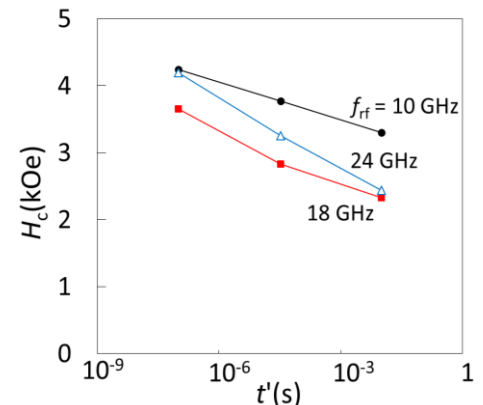


Fig. 2 Effective time dependence of coercivity for  $f_{rf} = 10, 18,$  and 25 GHz.

# 主磁極先端励磁型 PMR 書き込みヘッドのマイクロマグネ解析

中村 慶久 板垣 諒\* 金井 靖\*  
(東北大学電気通信研究所、\*新潟工科大学工学部)

Micro-magnetic Analysis for PMR Write-head energized on Main-pole Tip

Y. Nakamura, \*R. Itagaki, \*Y. Kanai  
(RIEC Tohoku Univ., Niigata Institute of Tech.\*)

## 1 はじめに

HDD の面記録密度の向上には、記録メディアの結晶粒の微細化と高保磁力化、それに呼応した書き込みヘッドの能力改善が不可欠である。現用の PMR 用書き込みヘッドは長手磁化方式の薄膜ヘッドを垂直磁化用に加工したものが始まりになっている。ヨーク部に巻いたコイルで励磁し、主磁極先端に磁束を誘導する、磁気回路的設計手法を基本に、開発以来、小型化・高性能化が図られてきた。その高性能化は、熱やマイクロ波などのエネルギーの助けを借りた HAMR や MAMR などの開発が精力的に進められているのとは逆に、対応する記録メディアとともに開発の勢いが急速に低下し、同時に HDD の高密度化も停滞している。

これに対して筆者は、垂直磁化方式の基本原則に基づけばできるだけ主磁極先端部を直接励磁することがキーであると考え、PMR の実験を成功させてきた。今後、HAMR や MAMR が世に出ても、いずれも垂直磁化方式は必須であり、できるだけ強く鋭い垂直磁界成分を発生する磁界発生部が必要になる。そのため、強い書き込み磁界で高速駆動でき、構造が簡単な主磁極先端励磁方式の可能性を、従来型のヘッドと比較して FEM 解析によって調べてきた[1]。その結果、低インダクタンスで高磁界を発生できることが確かめられたが、高速駆動の可能性をマイクロマグネの観点から確認する必要があることも指摘された。本報告では、それについて調べた結果を報告する。

## 2 解析法

マイクロマグネの解析には、富士通製「EXAMAG」を使用した。Fig.1 に現用書き込みヘッドを、また Fig.2 に筆者らが依然提案した主磁極先端励磁型ヘッドを、それぞれモデル化して示した。これらのヘッドについて、立ち上がり時間が異なる単位ステップ電流を加えて励磁したとき、主磁極先端部から生じる垂直磁界強度の時間変化を調べた。勿論、磁極内の微細な磁化変化についても調べている。

## 3 結果

FEM 解析から、主磁極先端励磁型にするとインダクタンスを低減でき、電気回路的にはより高速駆動が可能であることが明らかになっている。

Fig.3 は、コイルに立ち上がり時間 0.1 ns の単位ステップ電流を加えたときの主磁極先端磁界強度の時間変化をマイクロマグネ解析で調べたものである。電流の立ち上がりに対し、両ヘッドとも 0.17~0.18 ns 遅れて磁界が立ち上がり、終了までに電流の立ち上がり時間より 0.4~0.5 ns 遅れること、主磁極先端励磁の方がわずかに早いこと、などが判る。このことから、磁気的にはヘッド構造に依る時間遅れに大きな違いはなく、むしろ FEM 解析に見られるように、インダクタンスの減少による電気回路的な高速応答と効率的な励磁による記録磁界強度の増大が主磁極先端励磁の特長であることが確かめられた。

### [参考文献]

[1] 中村他、信学技報、Vol. 117, No. 338, MR2017-40, pp.87, Dec. 2017.

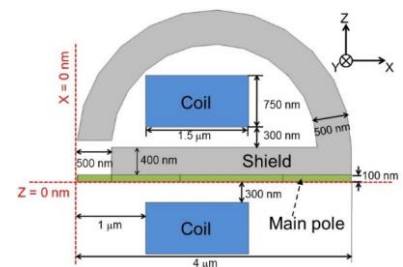


Fig. 1 モデル化した現用ヘッド

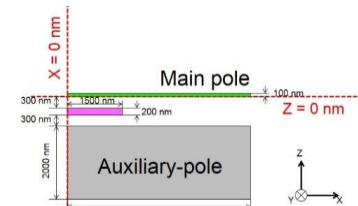


Fig. 2 主磁極先端励磁型ヘッド

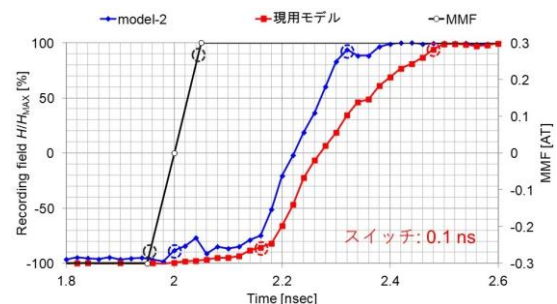


Fig. 3 主磁極先端磁界強度の立ち上り

# 磁氣的膜厚依存性抑制層を付加した GdFeCo 薄膜の全光型磁化反転

飯坂岳<sup>1</sup>, 吉川大貴<sup>2</sup>, 二川康宏<sup>1</sup>, 塚本新<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 日本大学大学院理工学部研究科, <sup>2</sup> 日本大学理工学部)

All -optical magnetization switching in GdFeCo with the additional layers

for suppressing the magnetic thickness dependency

Takeshi Iisaka<sup>1</sup>, Hiroki Yoshikawa<sup>2</sup>, Yasuhiro Futakawa<sup>1</sup>, Arata Tsukamoto<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ., <sup>2</sup> College of Science and Technology, Nihon Univ.)

**はじめに** スピントロニクスデバイスに向けた薄膜素子は、ナノメートルオーダーの微細化検討が進み、かつ高速化も望まれている。超高速磁化反転制御手段として、フェムト秒パルスレーザーによる極短時間の光をフェリ磁性 GdFeCo 薄膜に照射することのみ、外部磁場印加無しで決定論的磁化反転が誘起可能な全光型磁化反転現象 (All-Optical magnetization Switching : AOS) を報告しており<sup>1)</sup> 比較的組成依存性も小さい。一方、GdFeCo 単層薄膜は、30 nm 厚程度以下でフェリ磁性に起因した比較的大きな静磁気特性の膜厚依存性を有し、微細磁気素子設計の観点で不利である。それに対し、我々は希土類金属超薄膜を挿入することで、膜厚依存性を大きく抑制できることを報告しているが<sup>2)</sup>、挿入層の存在による AOS への寄与は未知であった。本報告では、同一組成で静磁気特性に大きな膜厚依存性が現れる薄膜と、同一作製条件で膜厚依存性抑制層を挿入した薄膜を作製し、同条件における AOS 誘起を行い、挿入層の寄与について実験的に検討を行った。

**実験方法** 測定試料には、マグネトロンスパッタリング法により作製した試料群 A : SiN(60 nm)/Gd<sub>25</sub>Fe<sub>65.6</sub>Co<sub>9.4</sub>(*t* nm)/SiN(5 nm)/glass sub.(*t* = 10, 15, 20, 25 nm), 及び、同膜厚範囲 *t* において GdFeCo 上下界面に Gd を 1 nm を挿入した試料群 B : SiN(60 nm)/Gd(1 nm)/Gd<sub>25</sub>Fe<sub>65.6</sub>Co<sub>9.4</sub>(*t* nm)/Gd(1 nm)/SiN(5 nm)/glass sub. を用いた。磁気特性の評価方法として、超伝導量子干渉素子型磁力計を用いて膜面垂直方向に磁場を印加した際の磁化曲線を計測し、飽和磁化を見積もった。次に、試料群 A, B のそれぞれ *t* = 10, 20 nm の試料を用い、中心波長 800 nm パルス幅 35 fs (半値全幅)の超短パルス光を膜面側より照射することにより室温にて磁化反転を誘起し、形成磁区を偏光顕微鏡の磁気光学像にて観察をした。

**実験結果** Fig. 1 に試料群 A, B における飽和磁化  $M_s$  の膜厚依存性を示す。試料群 A において、 $M_s$  の大きな膜厚依存性が確認された。これに対し、試料 B で  $M_s$  の膜厚依存性が大幅に減少することを確認した。Fig. 2 に上記超短単一パルス光を各試料に照射し、形成される磁区サイズ (円面積) を各照射光強度毎に示す。照射光強度に一意に対応し、正味の磁化特性の変化や膜厚抑制層の有無によらず、GdFeCo 膜厚 *t* が小さいほど、AOS 誘起に必要な照射光エネルギーが小さくなっている。AOS は、ほぼ製膜組成比及び積層磁性層厚により、一意に形成磁区サイズとその光強度依存性が決定されることが明らかになった。

**謝辞** 本研究は平成 25~29 年度文部科学省私立大学戦略的基盤形成支援事業(S1311020) および平成 26~30 年度文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 (研究領域提案型) ナノスピントロニクス変換科学(Grant No. 26103004) の助成を受けて行った。

## 参考文献

- 1) C.D.Stanciu *et al.*, Phys.Rev.Lett. 99, 047601 (2007)
- 2) Yasuhiro. Futakawa *et al.*, Technical Meeting on "Magnetics", IEE Japan, MAG-17-150 (2017).

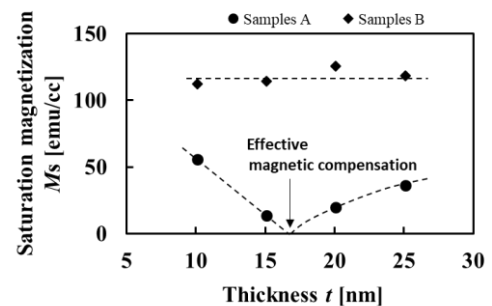


Fig. 1 Thickness dependence of  $M_s$  in samples A, B measured by VSM.

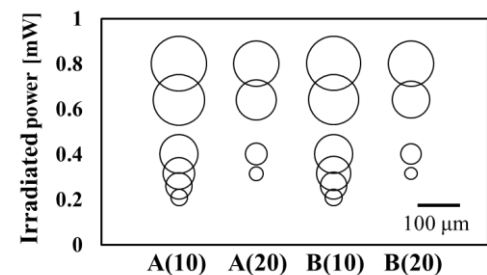


Fig. 2 The structure dependence of created domain sizes by AOS

A ( $t = 10, 20$  nm), B ( $t = 10, 20$  nm).